

导流角和凹面腔深度对 2 级 PDE 中激波聚焦的影响

赵 坤^{1,2}, 何立明¹, 曾 昊¹, 赵晨瑞³, 王 浩², 张伟东², 陈 月²

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038; 2. 中国人民解放军某部队, 河北沧州 061700;

3. 中国人民解放军某部队, 乌鲁木齐 830075)

摘要: 为了研究凹面腔内激波聚焦的机理以及导流角和凹面腔深度对激波聚焦的影响, 在不同导流角和凹面腔深度条件下开展了 3 维凹面腔内激波聚焦的数值模拟, 对各测量点的压力和温度进行分析。结果表明: 合适的导流角有利于激波聚焦, 导流角为 25° 时凹面腔底部的峰值压力和温度最高, 激波聚焦效果最好; 合适的凹面腔深度有利于激波聚焦, 凹面腔深度为 25 mm 时凹面腔底部的峰值压力和温度最高, 激波聚焦效果最好。

关键词: 2 级脉冲爆震发动机; 激波聚焦; 导流角; 凹面腔深度; 数值模拟

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.04.003

Effect of Diversion Angle and Concave Cavity Depth on Shock Wave Focusing in 2-Stage PDE

ZHAO Kun^{1,2}, HE Li-ming¹, ZENG Hao¹, ZHAO Chen-rui³, WANG Hao², ZHANG Wei-dong², CHEN Yue²

(1. College of Aeronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit **, the Chinese People's Liberation Army, Cangzhou Hebei 061700, China; 3. Unit **, the Chinese People's Liberation Army, Urumchi 830075, China)

Abstract: In order to research the mechanism of shock wave focusing in concave cavity and the influence of diversion angle and concave cavity depth on shock wave focusing, the numerical simulation of shock wave focusing in 3D concave cavity was carried out under the condition of different diversion angle and concave cavity depth. The pressure and temperature of each measuring point were analyzed. The results show that the proper angle of diversion is favorable for shock wave focusing, and the peak pressure and temperature at the bottom of concave cavity are the highest when the diversion angle is 25°, and the effect of shock wave focusing is the best; The proper depth of the concave cavity is favorable for shock wave focusing, and the peak pressure and the temperature at the bottom of the concave cavity are the highest when the concave cavity depth is 25 mm, and the effect of shock wave focusing is the best.

Key words: two-stage pulse detonation engine; shock wave focusing; diversion angle; concave cavity depth; numerical simulation

0 引言

2 级脉冲爆震发动机 (Pulse Detonation Engine, PDE)^[1-2] 是 1 种基于环形超声速射流对撞诱导激波聚焦起爆爆震的新型脉冲爆震发动机, 由俄罗斯的 Levin 等首次提出, 其工作过程中最重要的是连续超声速射流对撞诱导激波聚焦并起爆爆震, 而激波聚焦的效果好坏是能否起爆爆震的关键。目前, 国内外对凹面腔内激波聚焦进行了大量的试验和数值研究: 美国的科研人员^[3-4]发现在冷态条件下 2 维凹面腔内气流具有高频震荡的特点; 日本的 Taki 等^[5]研究了环形

超声速射流对撞诱导激波聚焦起爆爆震的过程; 空军工程大学的李海鹏、荣康、曾昊等^[6-8]研究了环形超声速射流对撞诱导激波聚焦的过程机理以及结构和射流参数对激波聚焦的影响; 南京理工大学^[9-10]等也对激波聚焦进行了试验或者数值模拟并取得了一定成果。

但是目前聚焦机理尤其是各结构和射流参数对激波聚焦的影响规律还没有定论。为了促进 2-Stage PDE 的研究进展, 必须把激波聚焦的机理及影响规律研究清楚。

本文基于冷态条件下开展了 3 维凹面腔内单循环激波聚焦的数值模拟, 研究了导流角和凹面腔深度

收稿日期: 2017-11-26 基金项目: 国家自然科学基金(91541109, 51406234)资助

作者简介: 赵坤(1992), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为脉冲爆震发动机技术; E-mail: 13228035006@163.com。

引用格式: 赵坤, 何立明, 曾昊, 等. 导流角和凹面腔深度对 2 级 PDE 中激波聚焦的影响[J]. 航空发动机, 2018, 44(4): 16-20. ZHAO kun, HE Liming, ZENG Hao, et al. Effect of diversion angle and concave cavity depth on shock wave focusing in 2-stage PDE[J]. Aeroengine, 2018, 44(4): 16-20.

对激波聚焦的影响。

1 物理模型和计算方法

本文采用3维全尺寸模型进行数值模拟,其结构及尺寸如图1所示。在凹面腔中轴线上布置4个测量点用来测量压力和温度。采用FLUENT软件进行计算,初始网格尺寸 $\delta=0.1\text{ mm}$,并根据压力梯度自适应加密。射流入口设置为压力入口边界, $p_{in}=0.46\text{ MPa}$, $T_{in}=300\text{ K}$,凹面腔内、外区域均为大气环境条件, $p_a=0.101325\text{ MPa}$, $T_a=300\text{ K}$ 。所有壁面均为刚性、绝热、无滑移。数值模拟采用非稳态N-S方程、有限体积法、标准 $k-\epsilon$ 湍流模型、标准壁面函数。以空气为介质,在无反应条件下开展数值模拟。

为验证本文采用数值算法的有效性,采用文献[11]

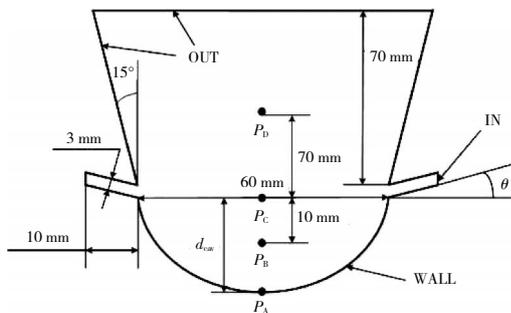


图1 数值计算模型

中的结构和参数进行数值模拟,并与试验结果进行对比,如图2所示。从图中可见,数值模拟结果与试验结果比较吻合,说明本文算法有效。

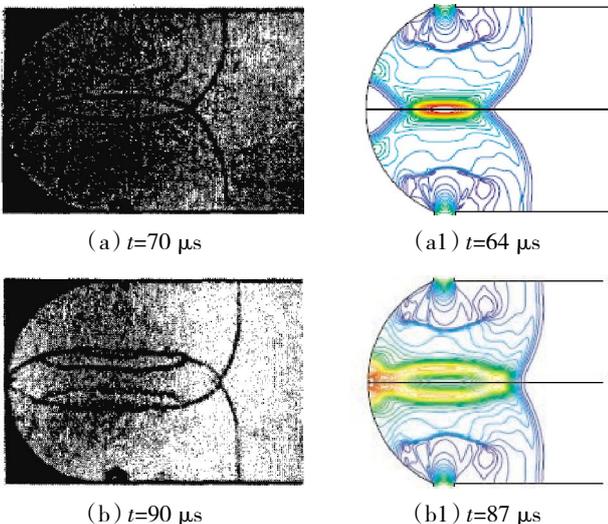


图2 文献试验结果与本文数值模拟结果对比

2 计算结果与分析

2.1 激波聚焦过程分析

为解释凹面腔内激波聚焦的过程,本文对导流角 $\theta=15^\circ$ 、凹面腔深度 $d_{cav}=20\text{ mm}$ 条件下的数值模拟结果进行分析。模型对称面上激波聚焦过程的压力如图3所示。高压气体在射流喷管内加速到超声速并从其出口喷出,在压力差作用下压缩凹面腔内低压静止气体形成椭圆形的前导激波,如图3(a)所示;随后,在 $t=83\text{ }\mu\text{s}$ 左右前导激波及其后的射流在凹面腔中轴线处对撞,如图3(b)所示;前导激波对撞后的反射激波与射流对撞后产生的激波相互耦合形成对撞激波,对撞激波左侧向凹面腔底部接近直到与凹面腔壁面碰撞后反射聚焦,使聚焦点的压力和温度升高,如图3(c)所示;经壁面反射的激波在聚焦后压力迅速降低并向尾喷管方向扩散,凹面腔内流场趋于稳定并进入下一循环,如图3(d)所示。

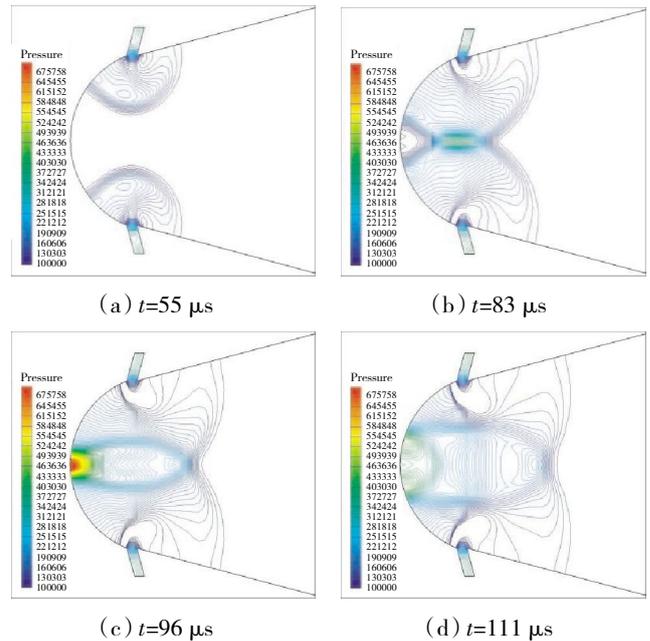


图3 激波聚焦过程压力

各测量点的压力变化曲线如图4所示。从图中可见, P_C 点的压力在 $t=85\text{ }\mu\text{s}$ 时达到峰值,说明前导激波以及其后的射流此时在 P_C 点附近对撞,导致对撞点的压力升高;随后距离 P_C 点最近的 P_B 点在 $t=91\text{ }\mu\text{s}$ 时达到峰值,且比 P_C 点的略大,这主要是因为左侧凹面腔封闭,激波及射流在向左侧运动的过程中,凹面腔内压力无法及时卸除; P_D 点的压力在 $t=97\text{ }\mu\text{s}$ 时达到峰值,比 P_C 点的峰值压力小很多,这是因

为 P_D 点靠近尾喷管外的大气环境, 导致对撞激波在向尾喷管方向扩散时压力迅速降低; P_A 点压力在 $t=96 \mu\text{s}$ 时达到峰值, 此时对撞激波在凹面腔底部反射聚焦, 导致压力大幅增加。在 $t=125 \mu\text{s}$ 之后, 各点压力基本平稳, 说明此时凹面腔内流场基本稳定, 第 1 个激波聚焦循环结束。根据各点压力的变化曲线所分析出来的规律与压力云图一致。

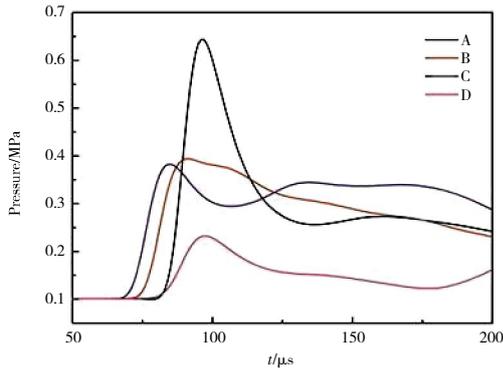
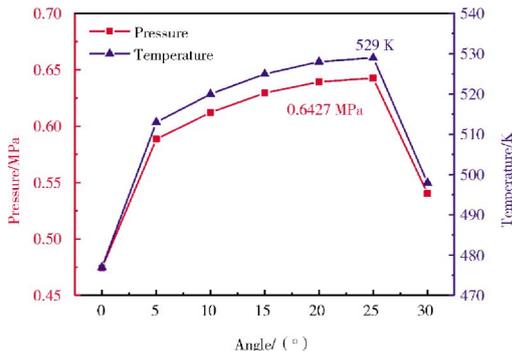


图 4 各测量点的压力变化曲线

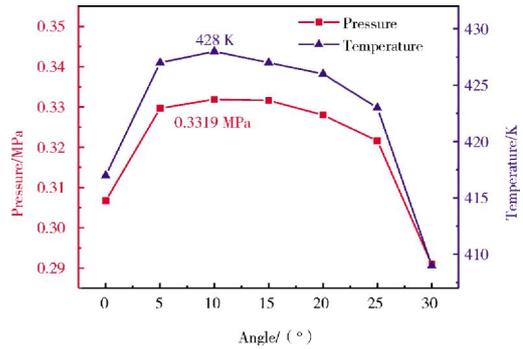
2.2 导流角对激波聚焦的影响

对于 2 级 PDE 而言, 增大导流角可以使射流对撞点更接近凹面腔底部, 并促进对撞激波向凹面腔运动, 有利于激波聚焦, 但是导流角的增大又会使对撞区域的能量降低, 使对撞激波强度减小, 不利于激波聚焦。本文在 $d_{cav}=30 \text{ mm}$ 时, 分别在 $\theta=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 时进行数值模拟, 得到不同导流角时各测量点的峰值压力和温度, 如图 5 所示。

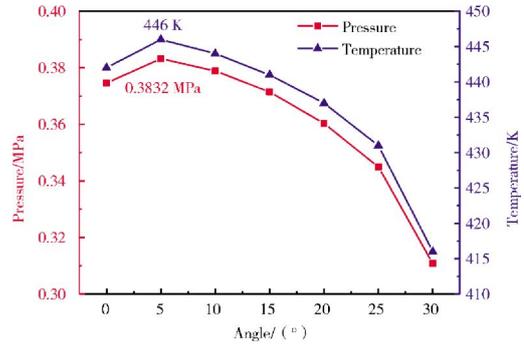
从图中可见, 4 个测量点的峰值压力和峰值温度随着导流角的增大都呈现出先升高后降低的趋势。在 P_A 点, $\theta=25^\circ$ 时达到最大值; 在 P_B 点, $\theta=10^\circ$ 时达到最大值; 在 P_C, P_D 点, $\theta=5^\circ$ 时达到最大值。由于 P_B, P_C 和 P_D 点的峰值压力和温度是由对撞激波经过时导致



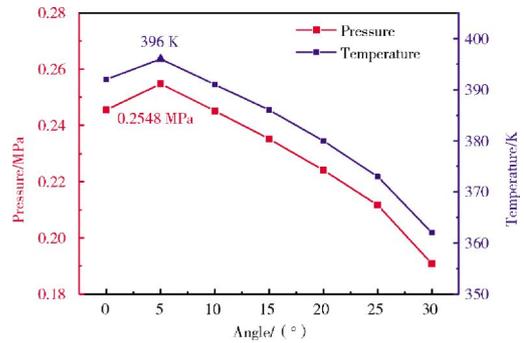
(a) P_A 点



(b) P_B 点



(c) P_C 点



(d) P_D 点

图 5 不同导流角时各点峰值压力和温度

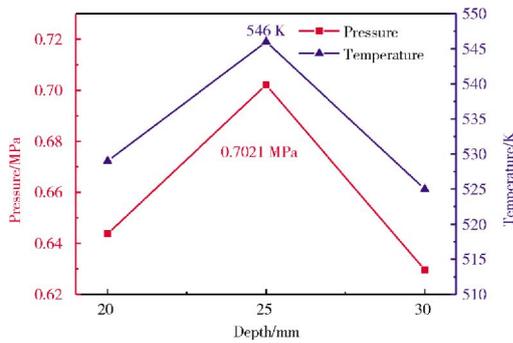
的, 所以这 3 个测量点峰值压力和温度随导流角的变化趋势基本一致, 在较小导流角时峰值压力和温度最高; 而 P_A 点的峰值压力和温度是由对撞激波反射聚焦所导致的, 所以其变化趋势与其余 3 点处的不同, 在较大导流角时峰值压力和温度最高。

鉴于射流对撞区域和激波聚焦区域的峰值压力和温度更能反映激波聚焦效果, 本文对 P_A 和 P_C 点的峰值压力和温度进行详细分析。从图 5(c) 可见, 在 $\theta=5^\circ \sim 30^\circ$, 随着导流角的增大, 射流对撞区域 (P_C 点) 的峰值压力和温度逐渐降低 (说明对撞区域能量减小), 且降低的幅值逐渐增大, 尤其是在 $\theta=30^\circ$ 时降低的幅值最大; 从图 5(a) 中可见, 在 $\theta=0^\circ \sim 25^\circ$, 随着导流角的增大, 激波聚焦区域 (P_A 点) 的峰值压力和温

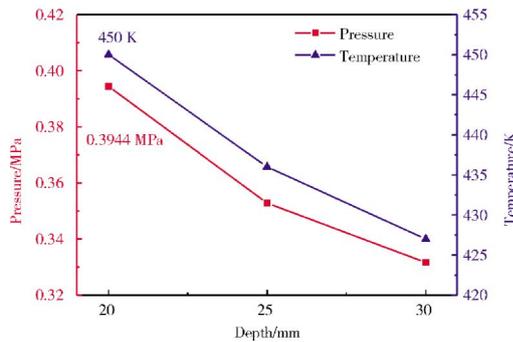
度逐渐升高,但是升高的幅值逐渐减小,这是因为此时射流对撞点能量减小,对撞激波强度减小,而在 $\theta=30^\circ$ 时射流对撞区域能量的大幅减小导致了激波聚焦的峰值压力和温度开始降低。综上所述,导流角过大或者过小都不利于激波聚焦,在 $\theta=25^\circ$ 时激波聚焦效果最好。

2.3 凹面腔深度对激波聚焦的影响

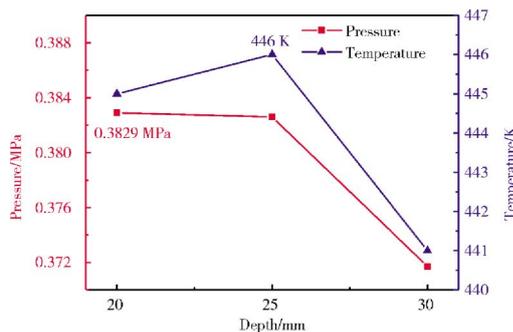
凹面腔深度越大,对撞激波在向凹面腔底部运动过程中的能量损失越大,不利于激波聚焦。但是对于开口直径不变的球型曲面而言,凹面腔深度增大时曲率也会随之增大,而曲率越大就会使激波反射后更容易聚焦。本文在 $\theta=15^\circ$ 时,分别对 $d_{cav}=20、25、30$ mm时的工况进行数值模拟,得到不同凹面腔深度时各测量点峰值压力和温度,如图6所示。



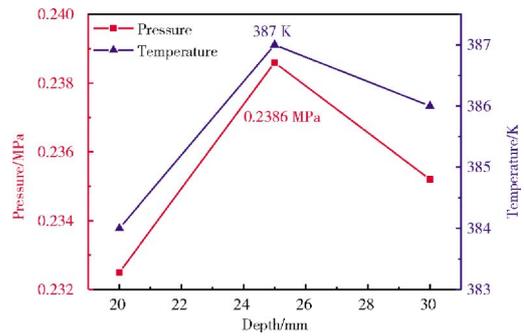
(a) P_A 点



(b) P_B 点



(c) P_C 点



(d) P_D 点

图6 不同凹面腔深度时各点峰值压力和温度

从图中可见,不同凹面腔深度时 P_C 点的峰值压力和温度相差不多,说明凹面腔深度对射流对撞的影响不大; P_D 点位于尾喷管内,受凹面腔深度的影响比较小,所以峰值压力和温度变化也不大; P_B 位于凹面腔内,凹面腔越深,射流向凹面腔内填充导致的压力升高值越小,其峰值压力和温度随凹面腔深度的增大而降低;对比 P_A 点的结果发现,在 $d_{cav}=25$ mm时峰值压力和温度最高,本文分析认为,此时的峰值压力和温度高于 $d_{cav}=20$ mm时的主要原因是凹面腔曲率大有利于聚焦,而 $d_{cav}=30$ mm时的峰值压力和温度小于 $d_{cav}=25$ mm时的主要原因是对撞激波传播距离长,能量损失大。综上所述,凹面腔深度过大或者过小都不利于激波聚焦,在 $d_{cav}=25$ mm时激波聚焦效果最好。

综上所述,导流角和凹面腔深度都对激波聚焦的效果造成较大影响,实际上凹面腔其他结构参数的变化同样会影响激波聚焦效果。如果改变凹面腔开口直径、尾喷管角度和长度等参数,可能会得到不同计算结果,但是基本规律是适用的,即导流角和凹面腔深度过小或者过大都不利于激波聚焦。

3 结论

本文以空气为介质在冷态条件下开展3维凹面腔内激波聚焦的数值模拟,得出如下结论:

- (1)合适的导流角有利于激波聚焦,在 $d_{cav}=30$ mm、 $\theta=25^\circ$ 时凹面腔底部的峰值压力和温度最高,激波聚焦效果最好。
- (2)合适的凹面腔深度有利于激波聚焦,在 $d_{cav}=25$ mm、 $\theta=15^\circ$ 时凹面腔底部的峰值压力和温度最高,激波聚焦效果最好。
- (3)本文仅采用数值模拟方法进行研究,并不能全面、准确地反映激波聚焦机理,后续将通过试验方

法继续研究。

参考文献:

- [1] Mawid M A, Park T W. Performance analysis of a pulse detonation device as an afterburner[R]. AIAA-2000-3474.
- [2] Roy G D, Frolov S M, Borisov A A, et al. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective[J]. *Process in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(6): 645-672.
- [3] Leyva I A, Tangirala V, Dean A J. Investigation of unsteady flow field in a 2-stage PDE resonator[R]. AIAA- 2003-0715.
- [4] Keith R, McManus, Dean A J. Experimental evaluation of a two-stage pulse detonation combustor[R]. AIAA- 2005-3773.
- [5] Taki S, Fujiwara T. A numerical study of detonation resonator[C]//In *Application of Detonation to Propulsion*. Torus Press, 2004: 257-261.
- [6] 李海鹏, 何立明, 陈鑫, 等. 凹面腔内激波聚焦起爆震波过程的数值模拟[J]. *推进技术*, 2010, 31(1): 87-91.
LI Haipeng, HE Liming, CHEN Xin, et al. Numerical investigation by shock wave focusing over cavity reflector [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(1): 87-91. (in Chinese)
- [7] 荣康, 何立明, 张建邦, 等. 喷口导流环结构对激波聚焦起爆的影响分析[J]. *推进技术*, 2012, 33(2): 299-305.
RONG Kang, HE Liming, ZHANG Jianbang, et al. Investigation on the effects of deflector structure on detonation initiation by shock wave focusing[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(2): 299-305. (in Chinese)
- [8] 曾昊, 何立明, 吴春华, 等. 不同形式扩张喷管对两级 PDE 性能的影响[J]. *推进技术*, 2013, 34(8): 1139-1146.
ZENG Hao, HE Liming, WU Chunhua, et al. Investigation for effects of diverging nozzles on two-stage PDE performance [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(8): 1139-1146. (in Chinese)
- [9] HAN Xu, ZHOU Jin, LIN Zhiyong. Experimental investigations of detonation initiation by hot jets in supersonic premixed airstream [J]. *Chinese Physics: B*, 2012, 21(12): 124702.1-124702.5.
- [10] 王栋. 脉冲爆震发动机工作过程数值模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
WANG Dong. Numerical investigation on work process of pulse detonation engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [11] Yungster S. Analysis of nozzle effects on pulse detonation engine performance[C]//41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. US-A: AIAA, 2003: 1316-1-1316-12.

(编辑: 刘 静)